

3 先端 EMC 技術 (較正技術)

3 Advanced EMC Measurement Technologies (Techniques for Calibrations)

3-1 標準電圧電流発生器の校正

3-1 Calibration of Standard Voltage and Current Generator

浜田 リラ

HAMADA Lira

国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) で行っている校正サービスのうち、テスターやマルチメータを校正するために用いる標準電圧電流発生器の校正方法が十数年ぶりに変更された。ここではその変更点と、それに伴う不確かさの変更点について解説する。また、「較正 DX」の一環として各技術の業務全体への適用について述べる。

The National Institute of Information and Communications Technology (NICT) have been provided the calibration services of radio equipment as the top of the legislative calibration laboratories in view of Radio law in Japan. The calibration method for the standard voltage-and-current generator owned by us to calibrate the tester and multimeter is changed for the first time in these 10 years. This paper describes the calibration procedure changes including the uncertainty budgets. In addition, the application of digital technology to the calibration service is described as a part of the calibration digital transformation (Calibration DX).

1 まえがき

標準電圧電流発生器 (standard voltage and current generator: 以下、VC) とは、テスターやマルチメータと呼ばれる電圧電流計を校正するために、任意の直流及び交流の電圧・電流を精密に発生することが可能な信号源である。

NICT は 2006 年から、JCSS 登録事業者として電圧電流計の校正用の標準電圧電流発生器について、ISO/IEC17025:「試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項」[1] に基づく校正サービスを提供している [2]-[5]。特に JCSS 制度の詳細については、独立行政法人製品評価基盤機構の文献 [5] を参照されたい。

これまで、VC の校正は、校正の基準とする標準器 (常用参照標準) として NICT が所有する VC を使用し、その出力と被校正器である標準電圧電流発生器 (device under test: 以下、DUT) からの出力を、デジタル・マルチメータ (digital multimeter: 以下、DMM) で測定し比較する置換法により行っていた [2]。このため、VC を一年に一度、海外 (米国) にあるメーカーの校正ラボに送付し保守を行い、VC の性能が仕様値の範疇内^{はんちゆう}で維持されているのを確認することで、常用

参照標準としての性能を担保していた。しかし、近年の国内外の情勢により VC の保守作業や輸送に予期しない遅延等が発生するようになり、常用参照標準としての安定的な運用が困難になってきた。このため、今回、DMM を常用参照標準として使用する校正手順へ変更を行い、JCSS 登録変更の申請を行った。本報告では、手法の変更に伴う手順等や不確かさの変更について述べる。なお、校正原理等の詳細は 2016 年発行の文献 [2] に詳述されているため、旧手順との差分についてのみ解説する。

さらに、近年各分野において、業務効率化の手段としての自動化・DX 技術利用の機運が高まっている。これらの技術は、一般的な事務作業と同様な受付・見積・報告書 (校正証明書) 作成・納品・請求の業務手順をもつ校正業務についても親和性が高いと思われる。ただし、これらのツールの導入については、これまでまとめて議論されてこなかった。そこで、VC の校正作業を例に取り、現時点で利用可能な自動化・DX 技術の適用について考察する。

2 常用参照標準の変更起因する校正手順の変更と不確かさ評価

本手順の変更の際し、DUT の特性データの測定方法自体は従来と変わらない。ただし、データ取得後の校正値の算出式と不確かさ評価バジェットが異なる。以下にその内容を解説する。なお、「不確かさ (uncertainty)」については、例えば文献 [6]-[8] に定義や評価方法が記載されている。

2.1 校正手順の変更点

図1に変更前の手順、図2に変更後の手順を示す。また、変更前・変更後の標準電圧電流発生器の校正のトレーサビリティ体系図を図3及び4に示す。

旧手順では、図1に示すように、DUT を DMM で測定した結果と、常用参照標準器である VC を DMM で測定した結果と比較することで DUT の校正値を得る置換法を用いていた。このため、VC と DUT をそれぞれ測定しなければならない。具体的には

- (a) DUT を DMM に接続し、DUT の指示値 (= 出力値) を校正したい値 $V_{NOMINAL}$ に合わせたときの DMM に表示される値 V_{DUT} を読む。

$$V = V_{NOMINAL} + V_{DUT} - C_{DUT} \quad (1)$$

ここで V は DMM 自体の校正値である。また、 C_{DUT} は最終的に求めたい DUT の校正値である。

- (b) 常用参照標準器 を DMM に接続し、常用参照標準の指示値 (= 出力値) を校正したい値 $V_{NOMINAL}$ に合わせたときの DMM に表示される値 V_{STD} を読む。

$$V = V_{NOMINAL} + V_{STD} - C_{STD} \quad (2)$$

ここで、 C_{DUT} は常用参照標準の上位校正機関での校正値である。

- (c) 式 (1)、式 (2) から、 V 及び $V_{NOMINAL}$ を消去すれば、DUT の $V_{NOMINAL}$ における校正値 C_{DUT} を次式で決定できる。

$$C_{DUT} = C_{STD} - V_{STD} - V_{DUT} \quad (3)$$

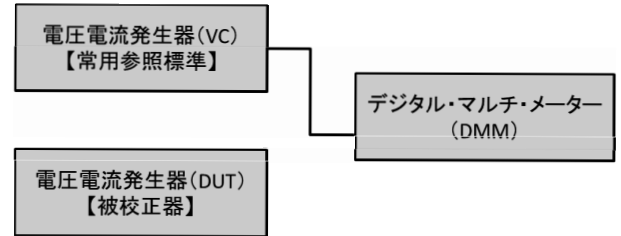
一方、新手順では図2に示すように、DUT を常用参照標準である DMM で直接測定するだけで校正値が決定できる。つまり、

DUT の指示値 (= 出力値) を、校正したい値 $V_{NOMINAL}$ に合わせたときの DMM に表示される値を V_{DUT} をとすると、

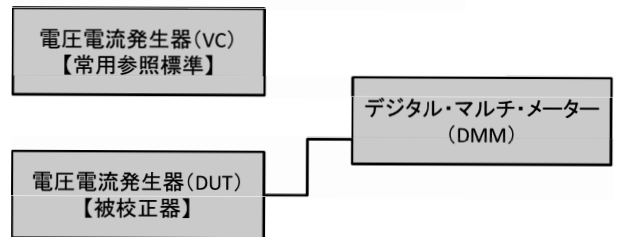
$$C_{DUT} = V_{NOMINAL} - C_{DMM} + V_{DUT} \quad (4)$$

となる。ここで C_{DMM} は DMM の上位校正値、 C_{DUT} が

DUT の校正値となり、式 (4) のみで校正値を求めることができる。

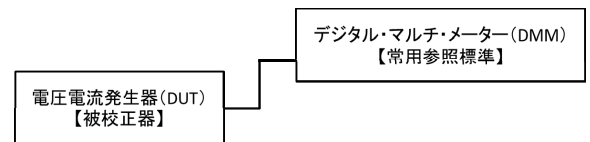


(1) 常用参照標準を測定



(2) 被校正器を測定し比較

図1 変更前の校正手順 (常用参照標準は VC)



被校正器を直接測定

図2 変更後の校正手順 (常用参照標準は DMM)

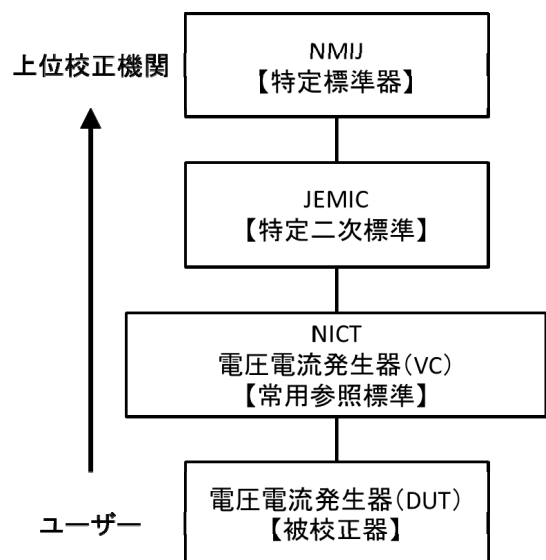


図3 手順変更前のトレーサビリティ体系図

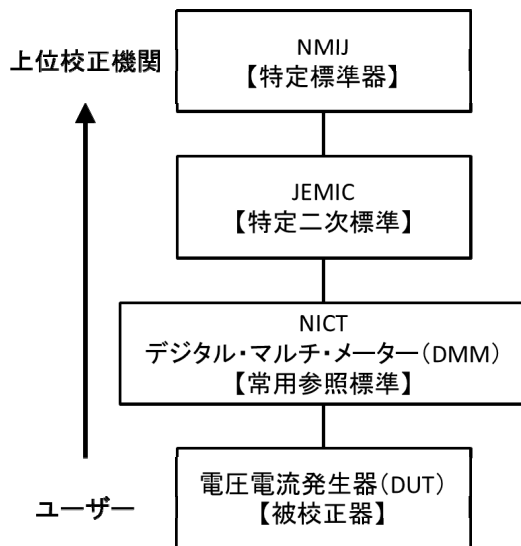


図4 手順変更後のトレーサビリティ体系図

2.2 手順変更後の不確かさバジェット

本校正結果の信頼の水準約 95 % を持つと推定される拡張不確かさは、式 (4) に基づくと、以下の要因によって生じる不確かさを合成することで推定される。このとき、合成標準不確かさを以下の計算式で求めることができる。

$$u(C_{DUT}) = \sqrt{u(C_{DMM})^2 + u(V_{DUT})^2 + s^2} \quad (5)$$

ただし、

$u(C_{DMM})$: 常用参照標準 (DMM) の上位校正機関での校正値を持つ標準不確かさ

$u(V_{DUT})$: DUT の指示値 (= 出力値) を $V_{NOMINAL}$ に合わせたときの DMM の測定値の標準不確かさ

s : 校正結果のばらつき

である。なお、以上 3 つの不確かさ要因の感度係数はすべて 1 であるため、上式から感度係数の記載は省いてある。以下にそれぞれの不確かさ要因と、不確かさバジェットの例を示す。

2.2.1 個別の不確かさ要因

【 $u(C_{DMM})$ 】の要因

(1) 上位校正機関による校正値を持つ不確かさ

校正証明書に記載の拡張不確かさを参照する。(正規分布、包含係数 $k=2$)

(2) 常用参照標準 (DMM) の仕様

経年変化 (1 年に一回メーカーで保守・校正を行っているため期間は 1 年間とする) に関する不確かさであり、取扱説明書に拡張不確かさとして記載された仕様値のうち、相対不確かさ (1 年間、95 % 信頼の水準、包含係数 $k=2$) を用いる。(正規分布)

【 $u(V_{DUT})$ 】の要因

(3) DMM の読取り桁落ち

DMM の読み取り最小桁の $\pm 1/2$ の値を用いる。(矩形分布)

(4) 熱起電力による影響 (直流電圧測定のみ)

電圧測定の際、DUT と DMM の (+) 端子と (-) 端子の温度差 (最大値) を測定し、熱起電力を見積もる。標準器及びテストリードの接点の素材はテルル銅 (熱起電力係数: $1.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 以下) である (矩形分布)。実際には、DUT に DMM を接続したときの温度差が $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 以下であることを確認して作業を行っており、このとき熱起電力が DUT に与える影響は小さく、無視できる。

(5) バードン電圧による影響 (電流測定時のみ)

バードン電圧 (burden voltage) とは、電流測定の際に DMM の入力インピーダンスによって生じる電圧降下によって DUT が被る影響である。DMM の入力インピーダンスに電流値を掛けてバードン電圧を求め、DUT 取扱説明書等の資料から影響を見積もる。(矩形分布)

【 s 】の要因

(6) 校正結果のばらつき

校正結果の平均値の標準偏差を求める。具体的には、DUT の出力を測定した値のばらつきを合成して決定する。(正規分布)

2.2.2 校正測定能力の例

校正測定能力とは、校正事業者が認定事業の範囲で実施する校正の最小不確かさである [6]。代表的な不確かさバジェット評価例として、直流電圧測定と直流電流測定の校正測定能力バジェットを表 1 及び 2 に示す。

ここで、電圧測定における校正測定能力は、上記の要因によって生じる標準不確かさを合成して得られる拡張不確かさ (信頼の水準 約 95 %、包含係数 $k=2$) のうち、とくに、「(4) 熱起電力の影響」について、代表的な電圧電流発生器 (FLUKE 5730A/5725A) を DUT とみなして見積もった値である。

また、電流測定における校正測定能力は、上記の要因によって生じる標準不確かさを、合成して得られる拡張不確かさ (信頼の水準 約 95 %、包含係数 $k=2$) のうち、とくに、「(5) バードン電圧によって DUT が被る影響」について、代表的な電圧電流発生器を DUT とみなし、バードン電圧は無視できる (0 V) として見積もった値である。

また、「(6) ばらつき」は、代表的な電圧電流発生器を 50 回 $\times 3$ セット繰返し測定し平均した結果から求めている。

実際の校正作業においては、不確かさは

(4) バードン電圧: 各 DUT の取扱説明書等の製品仕様を元に評価

(5) 熱起電力・(6) ばらつき: 各 DUT の測定値から求める。

3 先端 EMC 技術 (較正技術)

表 1 不確かさバジェット例 (直流電圧 1 V)

根拠 ①	分布	除数 ②	値 ③=①÷②	感度係数 ④	寄与 ③×④	自由度	備考		
【常用参照標準(DMM)の不確かさ】									
1	上位校正值	3 ppm	正規 ($k=2$)	2	1.5 ppm	1 μV	1.5 μV	∞	
2	標準器の仕様	4.1 μV	正規 ($k=2$)	2	2.05 μV	1 -	2.05 μV	∞	Fast モード, 分解能 7.5 桁
【DUTの測定時の不確かさ】									
3	DMM桁落ち	0.05 μV	矩形	$\sqrt{3}$	0.029 μV	1 -	0.029 μV	∞	7.5桁
4	起電力	1.5 $^{\circ}\text{C}$	矩形	$\sqrt{3}$	0.866 $^{\circ}\text{C}$	1.3 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	1.13 μV	∞	3 $^{\circ}\text{C}$ 以内(±1.5 $^{\circ}\text{C}$ 以内)
5	バードン電圧	-	-	-	-	-	-	-	
【その他の要因による不確かさ】									
6	ばらつき	0.036 μV	正規	$\sqrt{3}$	0.021 μV	1 -	0.021 μV	2	3回測定
合成標準不確かさ						2.78 μV	∞	有効自由度	
拡張不確かさ (信頼の水準 約95%)						5.6 μV	$k=2$	$k=2$ として計算	

表 2 不確かさバジェット例 (直流電流 10 mA)

根拠 ①	分布	除数 ②	値 ③=①÷②	感度係数 ④	寄与 ③×④	自由度	備考		
【常用参照標準の不確かさ】									
1	上位校正值	0.05 μA	正規 ($k=2$)	2	0.03 μA	1 -	0.025 μA	∞	
2	標準器の仕様	0.14 μA	正規 ($k=2$)	2	0.07 μA	1 -	0.07 μA	∞	Normal モード, 分解能 6.5 桁
【DUTの測定時の不確かさ】									
3	DMM桁落ち	0.005 μA	矩形	$\sqrt{3}$	0 μA	1 -	0.0029 μA	∞	6.5桁
4	起電力	-	-	-	-	-	-	-	
5	バードン電圧	0.018 V	矩形	$\sqrt{3}$	0.01 V	10 nA/V	0 μA	∞	入力インピーダンス×電流値
【その他の要因による不確かさ】									
6	ばらつき	0.001 μA	正規	$\sqrt{3}$	0 μA	1 -	5.8E-04 μA	2	3回測定
合成標準不確かさ						0.0744 μA	∞	有効自由度	
拡張不確かさ (信頼の水準 約95%)						0.15 μA	$k=2$	$k=2$ として計算	

3 電圧電流発生器の校正における自動化・DX 技術導入について

ここでは、電圧電流発生器の校正の一連の手順における、自動化・DX 技術の導入検討について考察する。検討の目的としては、業務担当者の負担軽減やミスの防止、ノウハウを含めた長期的なデータ蓄積が挙げられる。なお、ここで述べる DX 技術の多くはクラウド上に構築されていることもあり、基本的な事項として、実際の運用に際してはサービス提供・ネットワーク安定性、サイバーセキュリティ等の観点での評価が、別途必須である。ただし、それらは個々の DX 技術に用いられている技術と直接関連するわけではないため、本報告では技術的な面での導入可能性について述べる。

3.1 校正作業時の測定データ取得への小型ロボットアーム導入

現在の電圧電流発生器の校正作業における効率化・自動化のボトルネックの一つに、各校正パラメータの変更ごとに発生する、バナナプラグ形状端子を手動で物理的につなぎ換える作業が挙げられる。つなぎ換えを自動で行うためには、切替えスイッチを導入することも考えられるが、10 mA から 10 A までの電流や、直流から 1 kHz の周波数を持つ電圧・電流の高精度計測に対応できる市販の切替えスイッチデバイスは存在しない。さらに、専用品を製作したとしても、不具合時の代替品の調達が難しくなる等の課題もある。

近年、人手が掛かる手動作業への代替として、協業ロボットを含む小型ロボットアームの導入が各分野で進められている。ケーブルつなぎ換え作業自体は高度な判断を要しない繰り返しのため、汎用ロボットアーム導入による人手作業の代替は十分に可能と思われる。すでに、例えば、文献 [10] のように画像認識や力覚センサー技術を使用した、コネクタ・ケーブルの自動抜き差し・接続替えが可能な商用ロボットアームは存在しており、設置場所等の要件を満たせば、技術的には導入可能なところまできている。また、汎用ロボットアームを用いれば、現在、手動で行っている前面パネルのボタン操作による機器設定の自動化も可能になる。さらに、ケーブル脱着にネジ回し動作が必要なつなぎ換え動作のある同軸ケーブル系コネクタを持つ校正品目の自動化への適用も、今後、ケーブルアタッチメントの工夫等で可能になると見込まれるため、汎用ロボットアームの導入は、中期的にみれば有用である。また、基本的にはこれまで人が行っていた動作を置き換えるだけなので校正システム全体として動作が不明な点が少なく、システムのブラックボックス化を防ぐことができるのも、汎用ロボットアーム導入の利点で

ある。さらに、ロボットアームに搭載した画像・トルク等の各種センサーの情報を集約・分析して活用することができれば、例えば、現在別々の担当者が行っている複数品目の校正作業のうち、いくつかの品目のデータ取得をロボットアームで代替することが可能になる。つまり、1 名の担当者が複数の品目の校正を、同時に平行して行うことが可能になり、校正業務全体の効率化に役立つと思われる。

3.2 成績書等の外部への発出文書の作成・管理への文書作成・レビュー支援システムの適用

校正業務では、校正申請者からの申込書類の記載内容の確認や、成績書作成時の各種事項の転記、過去データとの照合、さらに受付時の校正手数料見積・請求書発行など、特に外部への発出文書の内容・書式チェック・転記・突合作業等の事務作業が多く発生する。その上、校正申請者に向けた作業とは別に、各校正品目について存在する校正証明書の書式・作業手順書・マニュアルの変更履歴や、使用機器の管理記録、JCSS 登録事業者としての内外の監査時に提出する文書対応を含めて、厳密な管理が行われている。これらの文書の作成・管理には、同様に厳密な文書管理が要求される法務・契約文書レビューに用いられている AI 文書作成・レビュー支援システムの適用が考えられる。これらのシステムは、適切な参照用文書データを設定することが必須ではあるが、定められた書式にのっとりた体裁・語句のチェック、欠落部分の指摘、過去の類似文書例の提示が自動で可能である。また、修正履歴の蓄積やバージョン管理、複数名でのレビュー・コメントが可能のため、文書管理や技能継承の点で十分利用価値はあると考える。そのほか、見積書や校正成績書等の外部発出文書のチェックには、最終文書のスキャンデータの記載内容と転記元のデータを突合することも有効と考えられる。この目的で、いわゆる AI-OCR の併用もミスの軽減には有効であると考えられる。

3.3 校正証明書に関連する DX の動向

最後に、産業技術総合研究所 計量標準総合センター (National Metrology Institute of Japan: NMIJ) のデジタル校正証明書 [11] に代表される校正証明書の DX について簡単に触れる。2016 年頃から、IoT 技術の普及等により、校正証明書についても人間を介さずに測定システムが容易に処理できる (machine-readable) など、校正証明書のデジタル化に関する議論が国際的になされている。この流れのなかで、デジタル校正証明書のファイル形式や記述方法の標準化等の具体的な議論がなされている [12][13]。

これらの動向を踏まえ、NMIJ では 2022 年秋から希望する申請者に対してデジタルデータ・電子認証を付帯した人間が読める形式のデジタル校正証明書の発行を開始している。デジタル校正証明書の発行は、改ざん防止等の一般的なセキュリティに加えて、トレーサビリティ担保の方法や国際相互認証への対応など引き続き検討すべき課題は残されている。しかし、申請者側の利便性が格段に向上することから今後も普及していくものと期待でき、また、NICT の校正業務においても対応していく必要がある。

以上、現状で利用可能な自動化・DX 技術をいくつか紹介した。将来的にこれらのツールを使う方向性が、校正サービスの向上や、業務の安定的な実施、担当者の負担軽減や技能継承に有効であるという見通しを得た。今後の校正業務の継続のためには、これらのツールを活用し可能な効率化を実現し、効率的に人的リソースを割り当てていくことが、長期的に、校正業務を安定・継続して校正結果を提供できる方策ではないかと考える。

一方で、校正技術の熟達や知見の蓄積、継承にはそれなりの時間を要し、また業務自体の内容や適性にも大きく左右される。このため、校正現場におけるデータや知見をどのように整理・蓄積し継承していくか、また、業務全体を把握し、NICT 内外の将来的な制度設計も含め校正業務を安定して運営できる人材を確保していけるかは、継続的な課題である。

4 あとがき

近年、「VUCA (Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity)」という言葉を意識せざるを得ない出来事が頻発しており、それまで考慮する必要がなかった事態や、新規技術の台頭に対応を迫られることが起こっている。今回の校正手順変更が、海外での標準器の校正に関わる国際サプライチェーンのリスク回避が動機であるように、校正業務に関しても実運用や手順の見直し等を含めて、常に新しい技術・手法の情報収集や検討・採用を視野にいれて柔軟に取り組んでいかねばならない。一方で、本報告で紹介したような各種 DX 技術も登場しており、これらを効率的に組み合わせて業務を安定して行えるよう運用していくことも、校正関係者に要求されているといえる。特に先進的な自動化・DX 技術については、一般に、公的機関が先導して試行・導入例を提示してほしいと民間から要望されている。NICT としても校正業務に限らず、様々な場での自動化・DX 技術の利活用を検討していくべきであろう。

謝辞

本報告をまとめるにあたりお世話になりました電磁環境研究室の校正関係者の皆様に感謝いたします。

【参考文献】

- 1 藤間・大高(編), ISO/IEC 17025 :2017 (JIS Q 17025 :2018) 試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項 要求事項の解説, 日本規格協会 (2018).
- 2 藤井 勝巳, 酒井 孝次郎, 杉山 功, 瀬端 好一, 西山 巖, “2-3 標準電圧電流発生器の校正,” 較正技術及び無線機器試験技術特集, 情報通信研究機構研究報告, vol.62, no.1, pp.39-48, 2016.
- 3 杉山 功, 川原 昌利, 酒井 孝次郎, 瀬端 好一, 西山 巖, 町澤 朗彦, 松本 泰, “2-1 NICT 較正業務における ISO/IEC17025 マネジメントシステム,” 較正技術及び無線機器試験技術特集, 情報通信研究機構研究報告, vol.62, no.1, pp.5-10, 2016.
- 4 独立行政法人 製品評価基盤機構, JCSS の概要 <https://www.nite.go.jp/iajapan/jcss/outline/index.html>
- 5 独立行政法人 製品評価基盤機構, ISO/IEC 17025 の概要 <https://www.nite.go.jp/iajapan/aboutus/ippan/iso17025.html>
- 6 今井(編), 測定における不確かさの表現のガイド [GUM] ハンドブック, 日本規格協会, 2018.
- 7 今井(編), 測定不確かさ評価の最前線—計量計測トレーサビリティと測定結果の信頼性, 日本規格協会, 2013.
- 8 独立行政法人 製品評価基盤機構, 測定不確かさとは <https://www.nite.go.jp/iajapan/aboutus/gijutsu/futashika.html>
- 9 産業技術総合研究所 校正測定能力 (CMC) っていったいなに? https://unit.aist.go.jp/riem/ds-rg/uncertainty/faq/ans_c/ans_c01.html#:~:text=%E6%A0%A1%E6%AD%A3%E6%B8%AC%E5%AE%9A%E8%83%BD%E5%8A%9B%EF%BC%88CMC%EF%BC%89%E3%81%A3,%E3%81%8B%E3%82%92%E8%A1%A8%E3%81%97%E3%81%A6%E3%81%84%E3%81%BE%E3%81%99%E3%80%82
- 10 エプソン, ロボット: 力覚センサー: 技術情報 <https://corporate.epson/ja/technology/search-by-products/robot/force-sensor.html>
- 11 産業技術総合研究所 計量標準総合センター (NMIJ): デジタル校正証明書発行のご案内 (2023 年 3 月 31 日) <https://unit.aist.go.jp/nmij/img/info-20230331-nmijdcc.pdf>
- 12 PTB, Digital Calibration Certificate - DCC <https://www.ptb.de/cms/en/research-development/ptbs-innovation-clusters/innovation-cluster-for-digitalization/kernziel1einheitlichkeitim/digital-calibration-certificate-dcc.html>
- 13 METAS, Boschung, et.al, PDF/A-3 solution for digital calibration certificates, Measurement: Sensors, Volume 18, December 2021, 100282
- 14 内窪 孝太, DMM 入門講座, 電波新聞社, 2007.



浜田 リラ (はまだりら)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
主任研究員
博士 (工学)
電磁環境工学

【受賞歴】

- 2017 年 平成 29 年度経済産業省国際標準化
奨励者表彰 (産業技術環境局長表彰)
- 2013 年 平成 25 年度日本 ITU 協会賞
国際活動奨励賞